

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR) NA DEFINIÇÃO LITOLÓGICA DA ÁREA DO PARQUE DO MICO LEÃO DOURADO NA BACIA DE CAMPOS, MUNICÍPIO DE CABO FRIO-RJ

Erikelly Barros¹, José M. A. G. Cesário¹, Adriana Ribeiro da Silva¹, Andresa Figueira Queiroz¹,
Miguel Ângelo Mane²

¹ Universidade do Estado do Amazonas, Unidade Acadêmica de Coari - erikellybarros@gmail.com -
jmcesario@gmail.com - adrianaribeiroasilva90@gmail.com - andresaqueirozEPG@gmail.com -

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro migangel@uerj.br

RESUMO

O Parque Ecológico do Mico-Leão Dourado situa-se na Bacia Hidrográfica do Rio São João na região de Cabo Frio no Estado do Rio de Janeiro. É uma área essencialmente preenchida de sedimentos do quaternário, cujos pacotes são o resultado da deposição continental da bacia de Campos. Embora o GPR (Radar de Penetração do Solo), tenha limitação em profundidade, seus perfis 2D têm as mesmas características de respostas da Sísmica de Reflexão, amplamente usada na Indústria de Petróleo e Gás. O processamento e a interpretação do GPR são baseados no princípio de reflexão de ondas eletromagnéticas, com o tempo de aquisição em ns.

O GPR é um método geofísico eletromagnético que emprega ondas de rádio em frequências muito altas (normalmente entre 10 a 1400 MHz), diferente da Sísmica que usa ondas mecânicas. Os dois métodos são úteis para localizar estruturas e feições geológicas embora o GPR tenha a sua profundidade de investigação em torno de 30 metros.

Neste trabalho, foram estudados perfis 2D de GPR, e o resultado corresponde a um conjunto de pacotes de sedimentos dispostos, cuja interpretação mostra ambientes transgressivos e regressivos, como consequência, a formação de cordões litorâneos. A Bacia de Campos possui a maioria do seu ambiente costeiro preenchido pelos referidos cordões, e esses resultados podem ajudar na compreensão da deposição de uma Bacia de Petróleo, tal como é a Bacia de Campos no Estado do Rio de Janeiro, através de análogos em mapeamentos estratigráficos.

Palavras-chave: Propriedades Dielétricas, Onda Eletromagnética, GPR.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos geofísicos envolvem técnicas de medição ou de rastreamento em superfície, não invasivos e, portanto, não destrutivos, empregados em estudos ambientais, estruturas geológicas em subsuperfície, ou com presença de resíduos enterrados, além de interferências de modo geral.

1.1 – Funcionamento do GPR

O funcionamento do método GPR se baseia na seguinte sistemática: um pulso (onda) de energia eletromagnética é irradiado para o interior do solo por uma antena transmissora, a energia refletida (Figura 1) é captada pela antena receptora, sendo o sinal, então, amplificado, formatado, armazenado e apresentado na tela de um notebook.

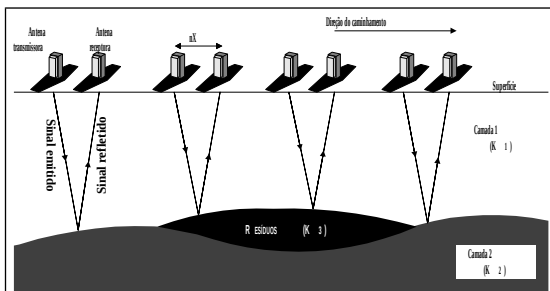


Figura 1. Esquema de emissão e reflexão do sinal GPR em subsuperfície.

A emissão das ondas de radar é produzida na forma de feixe de energia eletromagnética, aproximadamente cônico, com seção elíptica (Conyers 2004 - Figura 2). A antena irradia a maior parte da energia num feixe cujo ângulo (na direção de deslocamento da antena) é de 90°. A maior parte da energia de radiação fica compreendida dentro da zona definida pelo ângulo de radiação, que em muitas antenas utilizadas é de 45°. frequência em subsuperfície, permitindo mapeamentos 2D, semelhante a sísmica de reflexão.

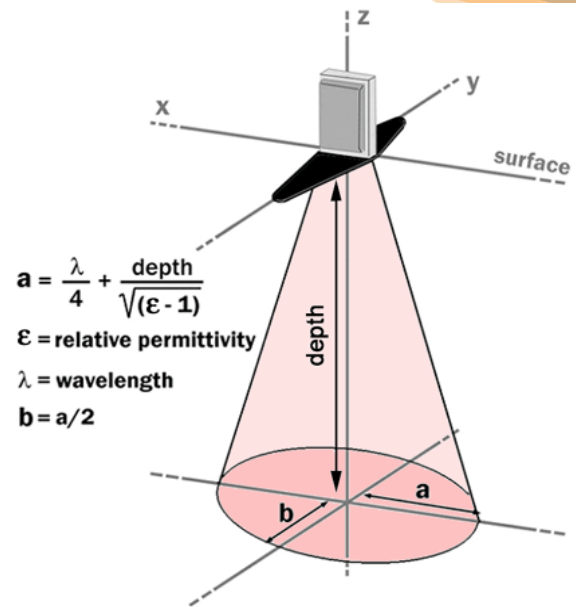


Figura 2 – Imagem de área mapeada no processo de transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas pelo equipamento de GPR (Conyers 2004).

Pode-se observar a relação geométrica entre a Permissividade Dielétrica Relativa (ϵ) e a área do alcance da onda em profundidade, “footprint” que é definido como a “área efetiva” de investigação. A tabela 1 mostra a relação entre frequência e profundidade de investigação das antenas mais comumente usadas.

Frequência Central (MHz)	Profundidade de investigação no solo (m)	Profundidade de investigação na rocha (m)
25	25	40
50	20	30
100	12	20
200	8	15
500	3,5	5
1000	1,5	3

Tabela 1 – Relação entre frequência e profundidade de investigação de algumas antenas de GPR.



O processo de imageamento de GPR na figura 3 mostra:

- Procedimento envolvendo movimentos repetitivos de deslocamento das antenas transmissora e receptora com espaçamento constante entre as antenas.
- Traços de GPR esquemáticos mostrando a chegada da onda aérea, a onda direta na Terra e da onda refletida nos substratos em subsuperfície.

As reflexões da onda eletromagnética em subsuperfície ocorrem nas interfaces de materiais com diferentes propriedades dielétricas.

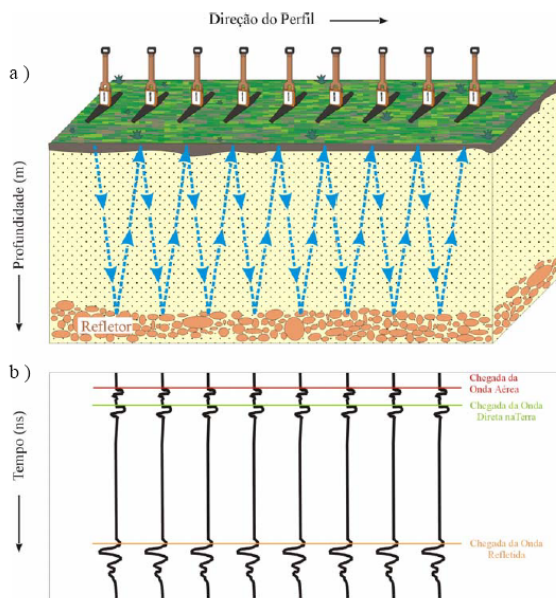


Figura 3 – Imagem de reflexão da onda de GPR em profundidade

A propriedade física envolvida neste fenômeno é a permissividade dielétrica, que é expressa pela constante dielétrica “K”.

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Onde: ϵ = permissividade dielétrica do meio e ϵ_0 é a permissividade no vácuo que é igual a $8,854 \times 10^{-12}$ F/m

A permissividade dielétrica pode ser definida como a medida da capacidade que um material isolante possui de armazenar cargas elétricas ou de se polarizar. Pode-se dizer que, para a maioria das aplicações, as reflexões das ondas de radar ocorrem nas interfaces de materiais com distintos valores de permissividade dielétrica (ϵ).

Na aquisição de dados de campo o GPR foi configurado pela sua frequência central (f_c), que no caso foi de 100MHz, sua largura de banda (Δf), a qual está associada à duração do pulso (Δt). As antenas transmissora e receptora foram projetadas para operar com uma razão entre a frequência central e a largura de banda em torno de 1 o que significa que o espectro da energia, variou de $0,5f_c$ (frequência mínima) a $1,5f_c$ (frequência máxima).

O GPR fornece seções contínuas em tempo real (distância percorrida x profundidade) dos perfis executados em campo, proporcionando o imageamento de alta resolução das estruturas ou feições em subsuperfície.

A frequência de operação é escolhida de modo a fornecer a relação mais vantajosa entre a penetração e a resolução para este objetivo, que é mais litológico. A maioria dos sistemas pode operar sob várias frequências.

A penetração do pulso de radar no interior do solo é limitada fundamentalmente pela condutividade do terreno. Ondas de radar com frequências que variam de 10 a 200 MHz apresentam maior profundidade de penetração que as frequências situadas no intervalo de 300 a 1000 MHz, porém apresentam menor resolução (menor detalhamento). Durante os levantamentos de campo, pode-se adequar o equipamento às condições locais dependendo da finalidade a ser alcançada.



2. GEOLOGIA DA AREA DE ESTUDO

A área de estudo está inserida no Domínio Tectônico de Cabo Frio (DTCF) (Schmitt, 2001) aflorante no extremo sudeste da Faixa Ribeira, um cinturão orogênico com *trend* NE-SW, que se estende ao longo da margem atlântica formado durante o Neoproterozóico-Eo-Paleozóico (Heilbron & Machado, 2003).

A subdivisão mais recente para a Faixa Ribeira foi proposta por Heilbron *et al.* (2004b), delimitando-a em cinco terrenos tectono-estratigráficos separados ora por falhas de empurrão, ora por zonas de cisalhamento oblíquas transpressivas. Estes terrenos são denominados de Ocidental, Paraíba do Sul, Embu (aflora apenas na porção sul da faixa), Oriental e Cabo Frio. A colisão destes terrenos é caracterizada pelo imbricamento de escamas crustais com vergência para oeste, em direção à margem do Cráton São Francisco (Figura 4).

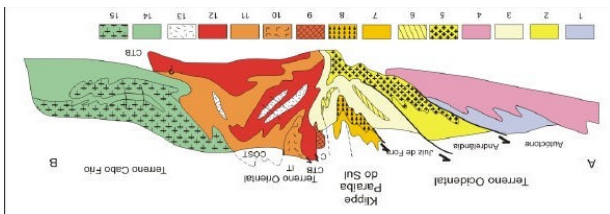


Figura 4 - Perfil estrutural composto do Orógeno Ribeira com a relação entre os diferentes terrenos e domínios estruturais. Legenda: Terreno Ocidental (1-6): 1 a 3 - Megassequência Andrelândia nos domínios Autóctone, Andrelândia e Juiz de Fora, Terreno Ocidental; 4 a 6 - Associações do embasamento (Complexo Barbacena, Mantiqueira e Juiz de Fora); Terreno Paraíba do Sul (7-8): 7-Grupo Paraíba do Sul; 8-Complexo Quirino; Terreno Oriental (9-13): 9- Sequência Cambuci; 10-Sequência Italva; 11- Sequência Costeiro; 12-Arco Magmático Rio Negro; 13-Granitos colisionais; Terreno Cabo Frio (14-15): 14-Sequência Búzios e Palmital; 15- Complexo Região dos Lagos (Heilbron *et al.*, 2004b).

3. METODOLOGIA

O levantamento de campo usando o GPR obedeceu ao procedimento de afastamento constante. Nessa técnica a geometria das antenas transmissora e receptora é mantida com uma distância fixa (no caso em 1m) e constante, sendo transportada passo a passo ao longo da linha, formando uma imagem 2D. O resultado obtido é uma imagem onde o eixo horizontal representa a posição das antenas (distância) e o eixo vertical é o tempo duplo do sinal de GPR (tempo de ida e volta), mostrando as variações das propriedades dielétricas da subsuperfície (reflexões) conforme ilustrado na figura 3.

Os perfis de reflexão GPR, comumente denominados radargramas, são então obtidos movendo-se as antenas transmissora e receptora com um intervalo de espaçamento constante. O resultado de um perfil GPR é uma imagem das variações em subsuperfície das propriedades dielétricas em função do tempo duplo de percurso do pulso eletromagnético. O resultado foi a obtenção de perfis 2D, que seguiram para a fase de processamento.

A etapa pós-campo englobou toda a compilação e comparação dos dados levantados na bibliografia e das medições na área. Esta etapa teve como objetivo promover os conhecimentos da geologia rasa da área e a interpretação 2D do perfil de GPR. Os dados de GPR foram processados utilizando-se o software *REFLEX V4.5* da *Sandmeier Scientific Software*.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O conhecimento das limitações do método GPR são necessários para se fazer um bom uso do método durante a aquisição dos dados (Porsani, 1999). Os fundamentos do método GPR estão embasados na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas, ou seja, nas equações de Maxwell. Estas



equações são utilizadas para estudar a estrutura interna da Terra, a partir de suas propriedades elétricas e magnéticas, descrevendo o comportamento do campo eletromagnético de qualquer meio. Entretanto, elas não possuem nenhuma informação sobre as propriedades elétricas dos materiais por onde os campos elétricos e magnéticos atuam. Dessa forma, é necessário introduzir as relações constitutivas do meio, que relacionam o campo elétrico externo aplicado ao campo interno pelas propriedades elétrica e magnética dos materiais.

4.1 – Propriedades Elétricas e Magnéticas

As propriedades EM dos materiais dependem de sua composição e umidade, ambos controlando a velocidade de propagação das ondas EM e sua atenuação (Annan, 1992). Os materiais geológicos (rochas sedimentares, ígneas e metamórficas) podem ser considerados semicondutores ou dielétricos, podendo ser caracterizados por três propriedades: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética.

4.2 – Condutividade Elétrica

A primeira relação constitutiva do meio, conhecida como lei de Ohm, relaciona a densidade de corrente de condução (\vec{j}) ao campo elétrico (\vec{E}), e é escrita como:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Nos materiais geológicos simples, essa relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica (σ). A condutividade elétrica de um material é uma medida de sua habilidade em conduzir corrente elétrica (Keller, 1987). A condutividade, em geral, é expressa em Siemens por metro (S/m). Para investigações rasas, como é o caso das aplicações do GPR, é mais comum trabalhar com a unidade mS/m.

Segundo Keller (1987), a condutividade (σ), ou o seu inverso, a resistividade (ρ), pode variar até 20 ordens de magnitude para os materiais geológicos. Os principais fatores que afetam a condutividade elétrica nos materiais geológicos próximos a superfície são: o teor de umidade, a porosidade, a salinidade, a proporção da fração argila e a presença de materiais condutivos.

4.3 – Permissividade Dielétrica

A segunda relação constitutiva do meio relaciona diretamente o campo elétrico (\vec{E}) à corrente de deslocamento, ou à polarização (\vec{D}), e a constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material (ϵ). Segundo:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

De acordo com Annan (1996), tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica são importantes, posto que afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar, respectivamente. Ward & Hohmann (1987) sugerem que a condutividade é dominante para as ondas EM de baixas frequências (<1 MHz), enquanto que em altas frequências (>1 MHz) a permissividade dielétrica é dominante. Usualmente, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) ou constante dielétrica dos materiais (k), definida como:

$$k = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

onde:

ϵ = permissividade elétrica do material (F/m);
 $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m, é a permissividade dielétrica no vácuo.

4.4 – Permeabilidade Magnética

A terceira relação constitutiva do meio relaciona diretamente o campo magnético (



\vec{H}) com o campo indução magnética (\vec{B}), e a constante de proporcionalidade é a permeabilidade magnética do material (μ). A permeabilidade magnética é obtida de acordo com a seguinte relação:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Em muitas situações geológicas, os fatores mais importantes que controlam as respostas GPR são as propriedades elétricas. Para a propagação de ondas EM nas frequências do radar, supõe-se que a permeabilidade magnética da maioria dos materiais geológicos é essencialmente independente da frequência, e não varia significativamente em relação à permeabilidade magnética do vácuo (Olhoeft, 1981; Keller, 1987). Portanto, o efeito da variação na permeabilidade magnética não tem sido considerado quando são feitas medidas eletromagnéticas na Terra (Topp *et al.*, 1980; Ward & Hohmann, 1987). Segundo Annan (1992), deve-se atentar para o fato de que os efeitos de uma forte permeabilidade magnética podem não ser totalmente ignorados nas seções de GPR.

Substituindo-se as relações constitutivas do meio nas equações de Maxwell, obtém-se as equações de propagação da onda EM num determinado meio, onde os fatores mais importantes que as governam são a velocidade e a atenuação. Maiores detalhes sobre as deduções matemáticas podem ser encontradas em Annan (1992) e Porsani (1999).

Para materiais geológicos com baixa perda, o campo EM propaga-se com uma velocidade de fase dada por:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}}$$

Onde:

c = velocidade da luz = $2,997 \times 10^8$ m/s $\cong 0,3$ m/ns;

k = permissividade dielétrica ou constante dielétrica dos materiais.

Na figura 5 é apresentada uma variação típica da constante dielétrica (k) com o conteúdo volumétrico de água nos solos. Essa curva foi obtida empiricamente por Topp *et al.* (1980), usando medidas do tempo de propagação de ondas eletromagnéticas nas frequências de rádio para diversos tipos de materiais geológicos.

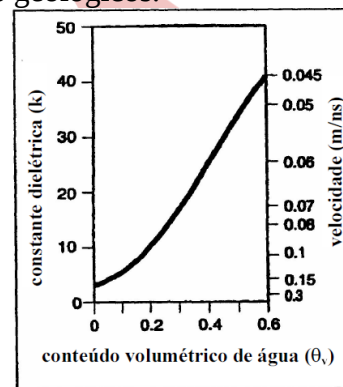


Figura 5 – Variação da constante dielétrica em função do conteúdo de água para os materiais geológicos (Topp *et al.*, 1980).

Além da constante dielétrica ser influenciada pelo conteúdo de água no meio, ela também reflete algumas interações, tais como: entre a porosidade, as características do fluido intersticial, a superfície específica, a mineralogia, a estrutura e a temperatura (Nunes, 2002).

A relevância de cada parâmetro varia com a frequência utilizada. Santamarina (2001) apresenta um estudo mais detalhado destas interações, expondo relações empíricas correlacionando alguns parâmetros do solo com a constante dielétrica, em função da frequência aplicada. O autor também relata a dificuldade em avaliar e medir o efeito de cada um destes parâmetros na propagação de ondas eletromagnéticas.

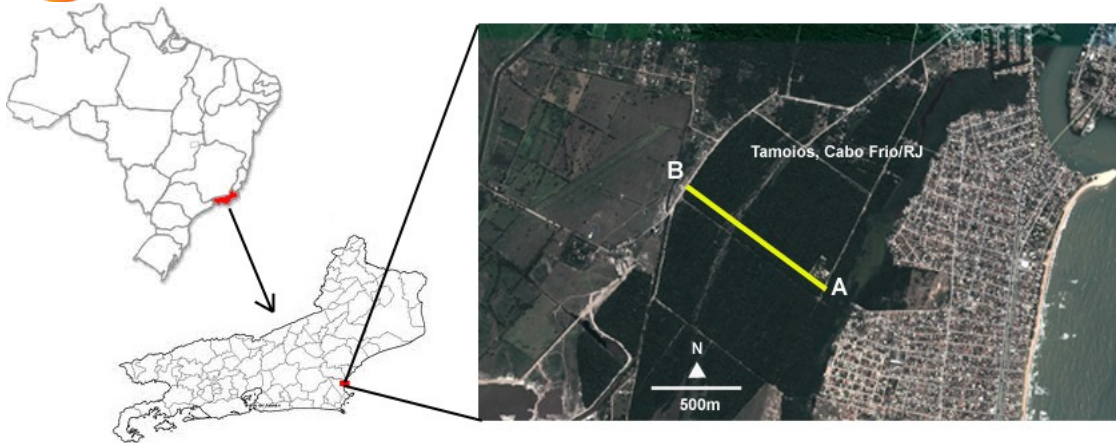


Figura 6 - Localização da área de estudo. A linha amarela corresponde à uma das sessões de GPR dos levantamentos geofísicos executados na área de estudo, cuja imagem é representada na figura 7 abaixo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme mostrado na figura 7, o GPR mostrou variações do solo desde a parte mais solta, passando pela intermediária a compacta. A área do Parque do Mico Leão Dourado, está essencialmente situada nos sedimentos quaternários. Essa feição se caracteriza de areias que reproduzem os tipos de solo observado. O GPR não tem grande penetração, mas se pode ver os pacotes mais superficiais e suas variações. Um método de investigação correlacionado com furos que possam existir na área, poderiam ser elementos de comparação. Entretanto, mesmo com pouca penetração, foi possível mostrar que se trata de um método de reflexão de onda eletromagnética, cuja sessão 2D se

assemelha a sísmica de Reflexão, muito usada na indústria de Petróleo e Gás. O entendimento que os alunos tiveram, transmitiu o conhecimento dos primeiros passos no que concerne ao processamento de dados dessa natureza e sua interpretação.

6. CONCLUSÕES

A conclusão a que se pode chegar é de que o GPR, mesmo em estudos de ambientes com pouca profundidade de penetração, pode servir para o conhecimento da distribuição das camadas litológicas em subsuperfície. O padrão observado na sessão 2D, permitiu aos estudantes conhecer a forma como se discriminam as camadas, as interfaces e as variações laterais, muito úteis na Sísmica.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

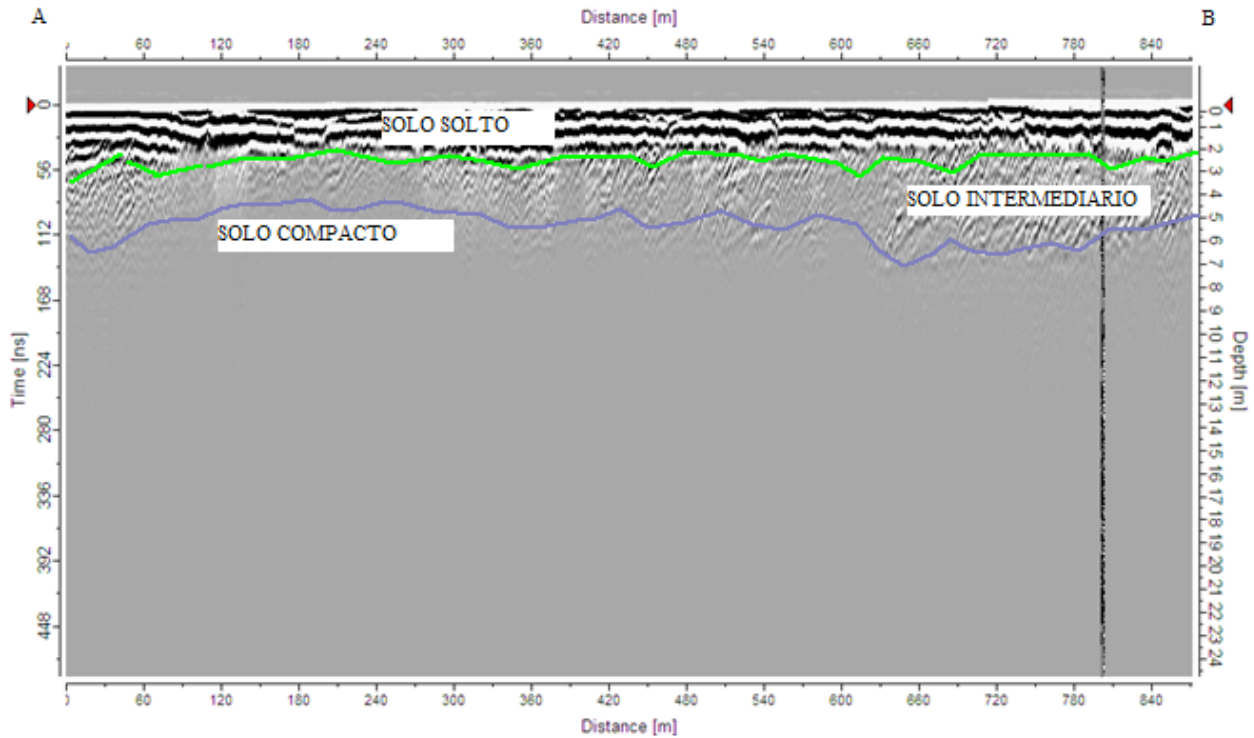


Figura 7 – Sessão 2D de 900 metros de extensão de GPR mostrando as camadas litológicas marcadas com padrões distintos, conforme correlação com observações de geologia de superfície.

www.conepetro.com.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNAN, A. P., COSWAY, S.W. 1992. Ground penetrating radar survey design. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Vol. 2, pp. 329-352.

ANNAN, A. P. 1996. Transmission dispersion and GPR. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 0, nº 2, pp. 125-136.

HEILBRON, M.; MACHADO, N. 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eo-Palaeozoic Ribeira Orogen (SE Brazil). Precambrian Research, 125(1-2): 87-112.

HEILBRON M., PEDROSA-SOARES A.C., CAMPOS NETO M., SILVA L.C., TROUW R. A J., JANASI V.C. 2004b. Brasiliano Belts in SE Brazil. Journal of Virtual Explorer, Volume 17, www.virtualexplorer.au.

KELLER, G. V. 1987. Rock and mineral properties. Investigations in Geophysics, nº 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, Vol. 1, pp. 13-51.

NUNES, C. M. F. 2002. Aplicações do GPR (Ground Penetrating Radar) na caracterização de perfis de alteração de rochas gnáissicas do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ.

PORSANI, J. L. 1999. Ground penetrating radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP. 145 p.

SCHMITT, R.S. 2001. A Orogenia Búzios – Um evento tectono-metamórfico Cambro-

Ordoviciano caracterizado no Domínio Tectônico de Cabo Frio, Faixa Ribeira – sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, IG/UFRJ. 273p.

TOPP, G. C., DAVIS J. L., ANNAN, A. P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, Vol. 16, nº 3, pp. 574-582.

WARD, S. H., HOHMANN, G. W. 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications. Investigations in Geophysics, nº 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, Vol. 1, pp. 131-311.

www.conepetro.com
.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br